

Estimativas dos fluxos de energia em áreas com cultivo de cana-de-açúcar e soja na mesorregião do Sul Goiano.

Alexandre da Silva Ferreira¹

Margareth Simões²

José Carlos Mendonça³

¹ Mestre em Engenharia de Computação – Área de Concentração Geomática – UERJ
CEP: 20550-013 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
alexfergeo@yahoo.com.br

² Embrapa Solos e UERJ FEN/DESC PPGMA
CEP 22460-000 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
margareth.simoese@embrapa.br

³ UENF - Laboratório de Engenharia Agrícola - CCTA/LEAG.
Caixa postal 28013-600 - Campos dos Goytacazes, RJ - Brasil
mendonca.josecarlos@gmail.com

Abstract. The phenomenon of evapotranspiration is essential for understanding the dynamics of the atmosphere in a region. At a time when discussions occur on the growth of agricultural production in Brazil and its insertion in the international market also growing concern about the environmental impacts caused by land use change, especially in the Brazilian savanna (cerrado) biome. This study aimed to estimate the surface radiation fluxes and evapotranspiration daily mesoregion South Goiano grow where agricultural activities of cultivating sugar cane and soybeans on grassland areas. The SEBAL algorithm was implemented with images of MODIS / Terra, supplemented with data from automatic weather station of Morrinhos, to estimate the surface radiation fluxes and evapotranspiration in daily mesoregion South Goiano. The values of energy flows R_n , G, H and λET , were calculated separately and the value of λET was obtained as waste of energy balance. Also identified were the values of these parameters in pixels cerrado, cane sugar and soybeans as land use representative of the study area. The results showed that the values of cane sugar were closer to the cerrado. The values of soybeans were different compared with the savanna and cane sugar. The daily values of actual evapotranspiration reached 6.0 mm.d^{-1} and slightly exceeded this value.

Palavras-chave: SEBAL, energy balance, evapotranspiration . SEBAL, balanço de energia, evapotranspiração.

1. Introdução

A atividade agropecuária tem sido considerada como uma das grandes responsáveis pelas alterações no uso do solo e, conseqüentemente, nos impactos no clima regional.

O desenvolvimento de rotinas computacionais, aliadas às técnicas de Sensoriamento Remoto, proporcionou nos últimos anos o surgimento de métodos de estimativas de dados ambientais de forma indireta e com baixo custo. Algoritmos que fazem usos de variáveis medidas em campo são processados junto a dados coletados por sensores orbitais com grande resolução temporal, trazendo resultados mais confiáveis, permitindo análises cada vez mais rápidas e precisas sobre o meio ambiente.

Atualmente, a porção central do território brasileiro sob o domínio do bioma do cerrado encontra-se em franco desenvolvimento da produção agrícola, especialmente da soja e da cultura canavieira, ambas incentivadas pela valorização das *commodities* no mercado internacional. Desta forma, grandes extensões de terra do estado de Goiás estão sofrendo uma reorganização territorial voltada para grande produção de monoculturas, especialmente avançando sobre áreas de vegetação nativa do cerrado. Este estudo objetivou mensurar os fluxos de energia na mesorregião do Sul Goiano para os cultivos de cana-de-açúcar e de soja.

2. Materiais e métodos

A metodologia empregada neste trabalho consistiu-se na aplicação do algoritmo SEBAL - *Surface Energy Algorithms for Land* (Bastiaassen, 1995) para realizar as estimativas dos fluxos de energia e evapotranspiração, seguindo a proposta de Allen, Tasumi e Trezza (2002), de forma idêntica ao realizado por Ferreira (2011), a partir do equacionamento do balanço de energia, sendo complementados com dados de temperatura e vento obtidos por meio de PCDs localizadas na área de estudo e cedidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O recorte geográfico utilizado neste estudo foi a mesorregião do Sul Goiano compreendendo uma extensa área de aproximadamente 131.579.001 Km², posicionada na porção central do território brasileiro, entre os meridianos 47°00' e 53°05' de longitude oeste e entre os paralelos 16°00' e 19°00' de latitude sul.

Cinco imagens orbitais do sensor MODIS/TERRA, produtos MOD09GA (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7), MOD09GQ (bandas 1 e 2) e MOD11A1 (LST) referentes à data juliana 100/2010 foram utilizadas. As imagens orbitais foram obtidas no site LPDAAC (*Land Processes Distributed Active Archive Center*) no sítio eletrônico <https://lpdaac.usgs.gov/>, pertencente ao Departamento Geológico Norte-americano (USGS). Para fazer a cobertura da área de estudo foram necessárias duas imagens, referentes aos *tiles* 12 e 13. Todo o pré-processamento das imagens foi realizado no aplicativo on-line *MODIS Reprojection Tool Web Interface (MRTWeb)* 4.1 disponível no site <http://mrtweb.cr.usgs.gov/>, onde foi possível realizar a escolha das imagens sem a presença de nuvens, e o download em formato GeoTIFF, sistema de projeção UTM, *Datum* WGS84 e dimensões de pixels de 250m para os produtos MOD09GQ, 500m para MOD09GA e 1km para MOD11A1. O ajustamento dos números digitais dos produtos MODIS foi realizado levando em consideração os fatores de escalas 0.0001 para os produtos MOD09 e 0.02 para as bandas MOD11.

Toda a implementação do algoritmo SEBAL foi realizada por meio de um modelo desenvolvido através da extensão *Model Maker*, parte integrante do *software Erdas Imagine 9.1*, assim como, as análises dos dados e o *layout* dos mapas foram realizadas no *software Arcgis 10.1*.

Os fluxos de energia foram determinados pelo balanço de energia na superfície terrestre, retratando a dinâmica do sistema terra-atmosfera, baseado na Equação 1.

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (1)$$

Onde,

$$\begin{aligned} R_n &= \text{radiação líquida (W.m}^{-2}\text{)} \\ G &= \text{fluxo de calor ao solo (W.m}^{-2}\text{)} \\ H &= \text{fluxo de calor sensível ao ar (W.m}^{-2}\text{)} \\ \lambda ET &= \text{fluxo de calor latente (W.m}^{-2}\text{)} \end{aligned}$$

O cálculo dos valores do saldo de radiação de superfície (R_n) foram feitos pela Equação (2), conforme Allen, Tasumi e Trezza (2002).

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (2)$$

Onde,

$$\begin{aligned} R_{S\downarrow} &\text{ é a radiação de onda curta incidente à superfície (W.m}^{-2}\text{);} \\ R_{L\downarrow} &\text{ é a radiação de onda longa incidente à superfície (W.m}^{-2}\text{);} \end{aligned}$$

$R_L \uparrow$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície ($W.m^{-2}$);
 ϵ_0 é a emissividade da superfície
 α é o albedo da superfície

O fluxo de calor ao solo (G) foi obtido por meio da Equação 3, e as correções para corpos d'água, cujo NDVI < 0, por meio da Equação 4, segundo Allen, Tasumi e Trezza (2002).

$$G = [T_s / \alpha (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) (1 - 0,98 NDVI^4)] R_n \quad (3)$$

$$G = 0,3.R_n \quad (4)$$

Onde,

T_s é a temperatura instantânea de superfície obtida através do produto LST (MOD11A1) em graus Celsius.

A estimativa do fluxo de calor sensível (H) foi realizada por meio da Equação (5).

$$H = \rho . c_p . dT / r_{ah} \quad (5)$$

Onde,

ρ é a densidade do ar úmido ($1,15 \text{ kg.m}^{-3}$)
 c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
 dT é a diferença de temperatura ($^{\circ}\text{K}$) entre duas alturas z_1 e z_2 acima do solo
 r_{ah} é a resistência aerodinâmica do ar para o transporte de calor medido em m.s^{-1}

A partir da elaboração das cartas de R_n , G e H foi estimado o fluxo de calor latente instantâneo (λET), como um resíduo do balanço de energia, conforme a Equação 6.

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (6)$$

A partir dos valores de λET e das Equações 7, 8 e 9, respectivamente, foram obtidas as estimativas da evapotranspiração real horária (ET_h) e da evapotranspiração real diária ET^{24h} (em mm.dia^{-1}) e da fração evaporativa diária, conforme Tasumi (2003).

$$ET_h = 3600 . \lambda ET / \lambda \quad (7)$$

Onde,

λ é o calor latente de vaporização (J.kg^{-1})

$$A = \lambda ET / R_n - G \quad (8)$$

A é a fração evaporativa no instante da passagem do sensor MODIS/Terra.

$$ET_{24h} = 86400 . \lambda . R_n^{24h} / \lambda \quad (9)$$

Onde,

R_n^{24h} é o saldo de radiação médio de 24 horas (Bastiaassen et al., 2005) ($W.m^{-2}$)

3. Resultados e Discussão

As variáveis biofísicas do NDVI, SAVI e IAF foram inicialmente obtidas na implementação do algoritmo SEBAL para servir de referência das condições das diferentes formas de usos da terra, conforme relacionados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores dos parâmetros biofísicos obtidos pelo SEBAL.

Usos da Terra	NDVI	SAVI	IAF
Cerrado	0,87	0,77	7,00
Cana-de-açúcar	0,71	0,63	2,55
Soja	0,53	0,47	1,08

Em estudos realizados por Ferreira et al. (2005) e Rizzi e Rudorff (2007), as espécies do cerrado, da cana-de-açúcar e da soja, atingem seu nível máximo de desenvolvimento fenológico entre os meses de fevereiro e maio, justificando assim, os valores elevados de NDVI e IAF. Segundo os estudos de Ferreira et al. (2005), foram obtidos valores de NDVI variando entre 0,40 e 0,85 para áreas de agricultura, especialmente na mesorregião do Sul Goiano, enquanto Rizzi e Rudorff (2007) destacam a tendência a estabilização a partir do mês de fevereiro. Para Oliveira et al. (2007), em experimento utilizando três espécies distintas de cana-de-açúcar, foram encontrados valores intermediários de IAF chegando até 4,0 entre os meses de dezembro e março, no estado do Paraná, visto que, ocorrem condições adequadas de temperatura e precipitação para o desenvolvimento da planta. Já os valores de SAVI encontram-se menores do que os valores de NDVI devido ao fator de ajustamento ao solo em que é processado. Os valores dos fluxos de radiação de superfície estão representados na Tabela 2 e nos mapas da Figura 1.

Tabela 2. Valores dos fluxos de energia de superfície obtidos a partir do SEBAL.

Usos da Terra	T_s	α	ϵ_0	$R_{L\uparrow}$	R_n	G	H	λET
	°K			$W.m^{-2}$	$W.m^{-2}$	$W.m^{-2}$	$W.m^{-2}$	$W.m^{-2}$
Cerrado	298,83	0,138	0,985	445,42	604,77	41,25	84,62	478,9
Cana-de-açúcar	300,10	0,152	0,975	448,62	586,92	57,82	27,44	412,5
Soja	302,67	0,174	0,96	457,27	554,62	76,64	183,64	294,3

A mesorregião do Sul Goiano apresentou os maiores valores de T_s encontrados na porção central, onde estão as áreas de maior concentração de solo exposto e atividades agrícolas. A temperatura média variou entre 298,7 °K (25,7 °C) e 312,2 °K (39,2 °C), com destaque aos valores mais elevados no ponto referente ao uso da terra referente à soja com 302,67 °K (29,67 °C), assim como, o valor do albedo de superfície, com 0,174, foi o mais elevado dos três usos selecionados.

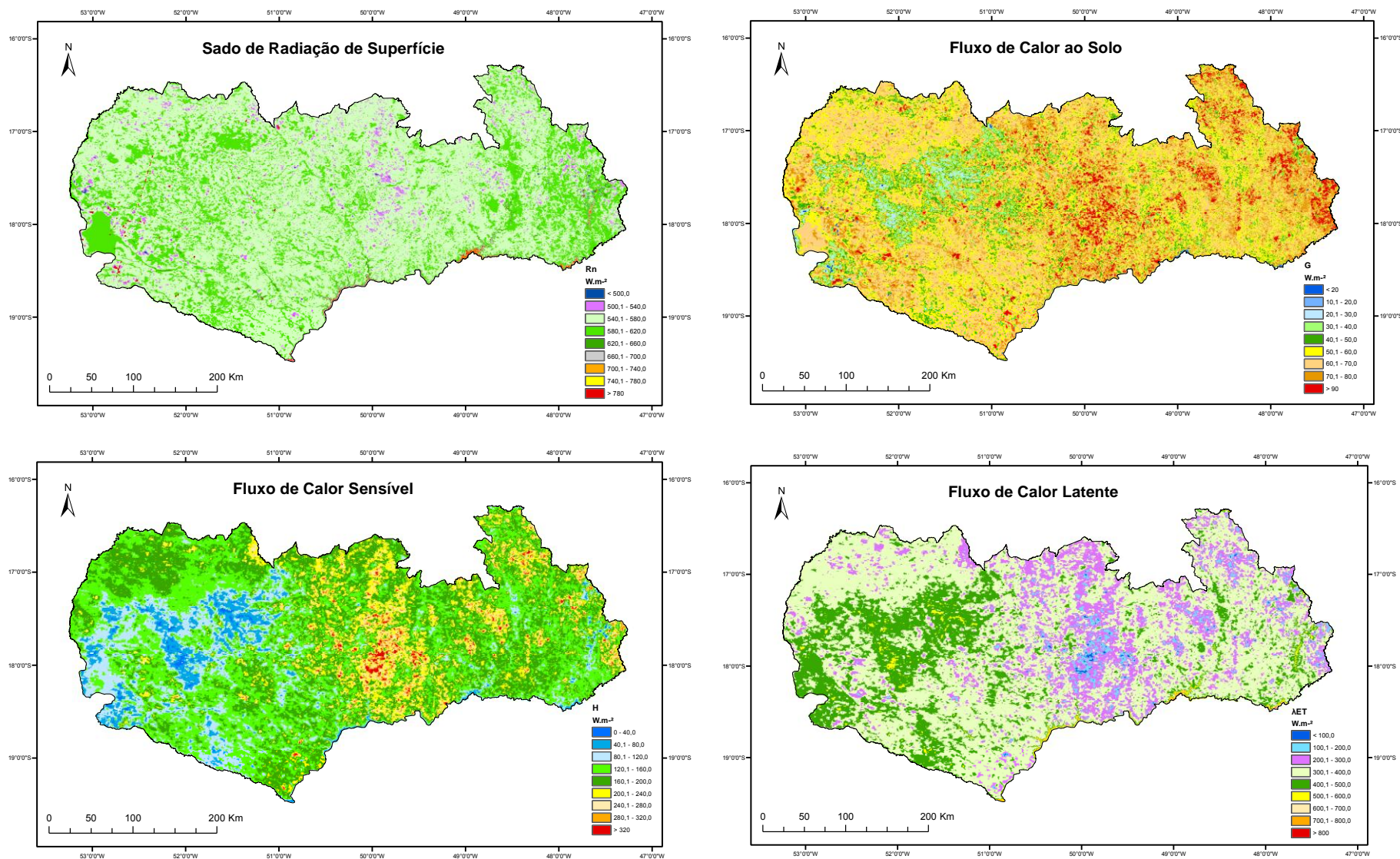


Figura 1. Mapas do saldo de radiação de superfície (R_n), fluxo de calor ao solo (G), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (λET) para a data juliana de 100/2010.

Os valores de radiação de onda curta incidente ($R_{s\downarrow}$) e radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$) foram estimados, respectivamente, $838,85 \text{ W.m}^{-2}$ e $332,62 \text{ W.m}^{-2}$ para o pixel da estação Morrinhos utilizada no processamento do SEBAL. O saldo de radiação à superfície (R_n) foi o primeiro produto estimado pelo SEBAL para o momento da passagem do sensor MODIS/TERRA, as 13:20 UTC, correspondendo as 10:20 hora local.

Os valores de R_n (Figura 1) mantiveram valores entre 500 W.m^{-2} e 600 W.m^{-2} variaram diretamente com os valores de NDVI, assim como Ruhoff et al. (2008) encontraram valores estimados com o algoritmo SEBAL variando entre 445 W.m^{-2} e 725 W.m^{-2} e valores medidos em campo variando entre 441 W.m^{-2} e 690 W.m^{-2} em áreas voltadas para o uso de cana-de-açúcar.

Os valores de fluxo de calor ao solo (G) referentes ao uso do cerrado ($41,25 \text{ W.m}^{-2}$), da cana-de-açúcar ($57,82 \text{ W.m}^{-2}$) e da soja ($76,64 \text{ W.m}^{-2}$) foram coerentes com a faixa esperada de 10% de R_n , assim como em diversos estudos apontam.

Os valores de fluxo de calor sensível (H) foram obtidos de duas maneiras, considerando os “pixel frio” e os valores do pixel da estação Morrinhos no lugar do “pixel quente”, proporcionando resultados mais ajustados reduzindo assim, o número de interações para 8 até 6 vezes, conforme Mendonça (2007).

O pixel “frio” foi detectado com valor de T_s de $295,89^\circ\text{K}$ ($22,7^\circ\text{C}$) e o pixel “quente” com T_s de $312,22^\circ\text{K}$ ($39,22^\circ\text{C}$). Os valores de H na área central da mesorregião do Sul Goiano, onde se encontram os usos do cerrado, da cana-de-açúcar e da soja estiveram acima de $80,1 \text{ W.m}^{-2}$. A cerca do valor de H encontrado para soja, Paiva (2005), fez usos de imagens do sensor AVHRR/NOOA sobre a cultura da soja, em Dourados, no Estado do Mato Grosso no dia 16/12/1999, por meio do algoritmo SEBAL, e encontrou valores médios instantâneos variando entre $150,78$ e $244,54 \text{ W m}^{-2}$ coerentes com os obtidos neste trabalho.

Os valores de λET variaram entre 401 W.m^{-2} e 500 W.m^{-2} por toda a área de estudo. Os usos da terra do cerrado e da cana-de-açúcar apresentaram os maiores valores de λET . O uso referente à soja apresentou valores de H devido ao baixo IAF o que proporcionou o aumento dos valores de G e uma menor disponibilidade da partição de energia para os processos biológicos, como a evapotranspiração. De acordo com Mendonça (2007) foram obtidos valores médios entre $202,68 \text{ W.m}^{-2}$ e $507,78 \text{ W.m}^{-2}$ em áreas com predomínio de cultivo de cana-de-açúcar no norte do estado do Rio de Janeiro.

A partição da radiação de superfície está representada na Figura 2.

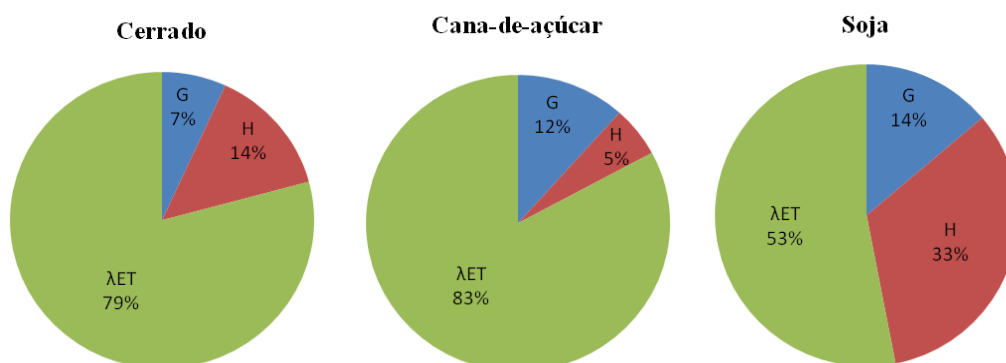


Figura 2. Gráficos representativos da partição da radiação de superfície dos usos da terra do cerrado, da cana-de-açúcar e da soja.

Através dos gráficos podemos observar que apresentaram valores dentro do comportamento esperado. Geralmente, os valores de G ficam próximos à 10% de R_n , conforme ocorreu com os usos da terra do cerrado e da cana-de-açúcar. A maior partição da

radiação ficou disponível para λET nos três usos, especialmente para o cerrado (79%) e a cana-de-açúcar (83%). O uso da terra referente à soja apresentou valores mais elevados em relação a G e H do que os de λET , respectivamente 14% e 33%. Pode-se entender desta maneira, que a partição de energia dentre os três usos da terra escolhidos, a soja apresentou as maiores discrepâncias, do que a cana-de-açúcar, em relação ao cerrado, sendo o que menos disponibilizou energia para o processo da evapotranspiração.

A distribuição da evapotranspiração real diária (ET_{24h}) está representada no mapa da Figura 3. Sob um aspecto geral, a evapotranspiração diária da mesorregião do Sul Goiano pouco ultrapassou os valores de $6,0 \text{ mm.d}^{-1}$ para a data Juliana de 100/2010 em que foi aplicado o algoritmo SEBAL, exceção das áreas de corpos hídricos apresentaram valores sempre acima de $7,0 \text{ mm.d}^{-1}$. Em sua grande parte, a ET_{24h} manteve-se entre $2,6 \text{ mm.d}^{-1}$ e $5,0 \text{ mm.d}^{-1}$. Algumas pequenas áreas isoladas a oeste mantiveram valores entre $5,01 \text{ mm.d}^{-1}$ e $6,0 \text{ mm.d}^{-1}$, áreas tipicamente de cerrado.

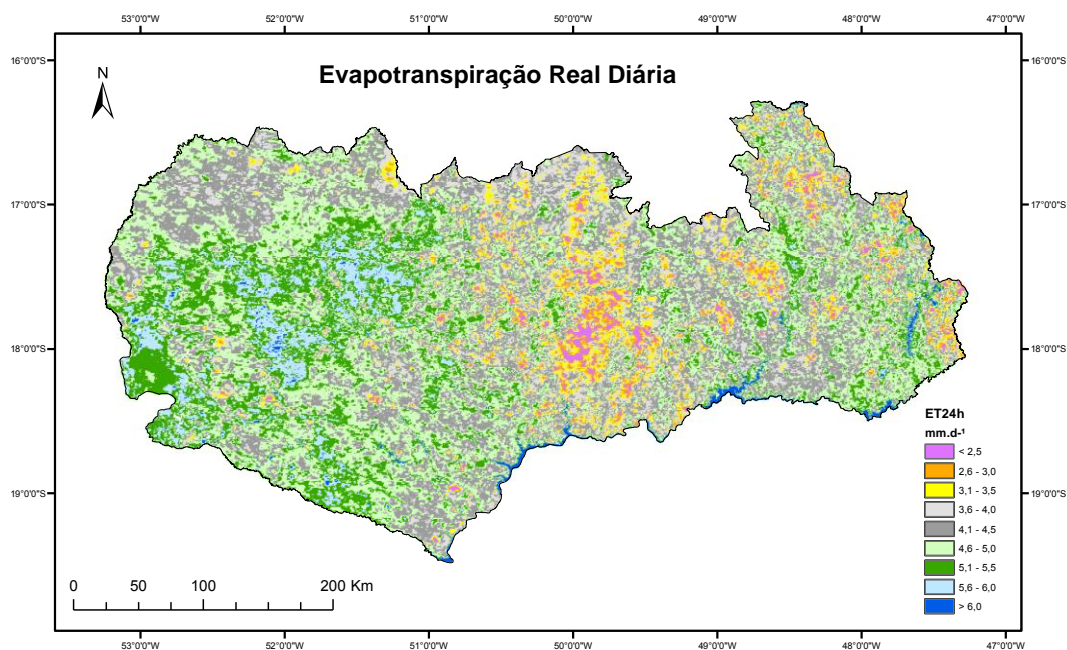


Figura 3. Mapa de evapotranspiração real diária, em mm.d^{-1} , para a mesorregião do Sul Goiano. Data juliana: 100/2010.

Foram encontrados valores inferiores a $2,5 \text{ mm.d}^{-1}$ até $3,0 \text{ mm.d}^{-1}$ nas áreas onde predominam as áreas de plantio agrícola (magenta e coral), concentrados na porção central da mesorregião do Sul Goiano, e valores na faixa de $4,6 \text{ mm.d}^{-1}$ até valores superiores a $6,0 \text{ mm.d}^{-1}$ em áreas de cerrado (verde claro e verde escuro) e em grandes corpos hídricos (azul escuro) ultrapassando os $6,0 \text{ mm.d}^{-1}$.

O valor de ET_{24h} obtido no uso da terra do cerrado foi estimado através do SEBAL em $5,41 \text{ mm.d}^{-1}$, assim como, o da cana-de-açúcar em $5,16 \text{ mm.d}^{-1}$ e o da soja em $3,98 \text{ mm.d}^{-1}$. A soja apresentou maiores discrepâncias em relação ao cerrado e a cana-de-açúcar evidenciada também nos fluxos de radiação de superfície.

4. Conclusões

Neste estudo foi realizada a implementação do algoritmo SEBAL para realizar a estimativa dos fluxos de energia da mesorregião do Sul Goiano utilizando os produtos do sensor MODIS/TERRA do dia Juliano 100/2010. Foi averiguado que o algoritmo SEBAL

estimou resultados coerentes com valores identificados em outros estudos com objetivos similares, fornecendo informações importantes sobre a partição da energia em superfície na área de estudo. Este método através do uso de sensores orbitais, a exemplo do MODIS/Terra, permitiu realizar estimativas de fluxos de energia em superfície de forma rápida e com baixo custo para uma extensa área, tal como a mesorregião do Sul Goiano. O valor encontrado nos uso da terra da cana-de-açúcar foi o que mais se aproximou ao valor estimado para o uso da terra do cerrado, do que o uso da terra referente à soja. O uso da terra referente à soja, por sua vez, apresentou valores discrepantes em relação ao do cerrado e da cana-de-açúcar em todos os parâmetros estimados pelo SEBAL.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela gentileza em disponibilizar os dados meteorológicos para realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) - Advanced Training and Users Manual - Idaho Implementation, version 1.0**. 2002, 98p.

Bastiaassen, W. G. M. et al. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v. 131, Issue 1, p. 85-93, 2005.

Bastiaassen, W. G. M. **Regionalization of Surface Flux Densities and Moisture Indicators in Composite Terrain – A Remote Sensing Approach under Clear Skies in Mediterranean Climates**. Ph. D. Thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands. 273p, 1995.

Ferreira, A. S. **Aplicação do algoritmo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na mesorregião do Sul Goiano**. Dissertação (Mestrado Geomática). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação / UERJ. Rio de Janeiro, RJ, 2011. Disponível em: <<http://www.geomatica.eng.uerj.br/dissertacoes>>. Acesso em: 07/ set. 2012.

Ferreira, E. M. et al. Análise da Sazonalidade de Paisagens Antrópicas e Nativas do Bioma Cerrado Através dos Produtos MODIS Índices de Vegetação, Área Foliar e Atividade Fotossintética. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 505-512.

Mendonça, J. C. **Estimação da Evapotranspiração Regional Utilizando Imagens Digitais Orbitais na Região Norte Fluminense, RJ**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campo dos Goytacazes, RJ. 2007.

Oliveira, et al. Área Foliar em Três Cultivares de Cana-de-açúcar e Sua Correlação Com a Produção de Biomassa. Goiânia, GO, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37(2): 71-76, jun. 2007. Disponível em: <www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/download/1672/1644>. Acesso em: 07 set. 2011.

Paiva, C. M. **Estimativa do Balanço de Energia e da Temperatura da Superfície Via Satélite NOAA-AVHRR**. 248p, Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

Rizzi, R.; Rudorff, B. F. T. Imagens do Sensor MODIS Associadas a um Modelo Agrônomico Para Estimar a Produtividade de Soja. Brasília, DF. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.1, p.73-80, jan. 2007. Disponível em: <www.scielo.br/pdf/pab/v42n1/10.pdf>. Acesso em: 07 set. 2011.

Tasumi, M. **Progress in Operational Estimation of Regional Evapotranspiration Using Satellite Imagery**. 357 p, Ph.D Dissertation. College of Graduate Studies, University of Idaho, 2003.